

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии PhD по специальности 6D072400 – Технологические машины и оборудование

Ешжанов Абилда Абдыкадырович

Разработка и расчет теплообменного аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

Актуальность диссертационного исследования. Аппараты с подвижной насадкой (взвешенной и фонтанирующей) получили распространение в промышленности благодаря простоте конструкции и нечувствительности к загрязненности газожидкостной среды твердыми примесями. Однако их существенным недостатком является значительное гидравлическое сопротивление, основную долю которого составляют затраты энергии на подъем насадочных элементов и поддержание их во взвешенном состоянии.

При регулярном размещении насадочных элементов на струнах в объеме контактной зоны гидравлическое сопротивление значительно снижается и при этом, за счет реализации регулируемого вихревого взаимодействия, значительно интенсифицируются проводимые процессы.

Вместе с тем, при проведении процессов пылеулавливания с частицами пыли, обладающими повышенными адгезионными свойствами происходит выпадение тонкодисперсных твердых частиц, отлагающихся на насадочных элементах и стенках аппарата, в результате чего возможно зарастание насадочного слоя, приводящего к нарушению синфазного режима, а, следовательно, к значительному снижению эффективности проводимых процессов.

Для эффективного проведения таких процессов созданы конструкции аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, которые позволяют использовать преимущества вихревого взаимодействия потоков в слое регулярной насадки с механической очисткой отложений при хаотическом движении взвешенных дискретных контактных элементов. Однако результаты исследований таких аппаратов отсутствуют.

В связи с этим, проведение исследований, разработка методологии расчета и проектирования аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой применительно к процессам массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания, рекомендаций по их проектированию и эксплуатации являются актуальными.

Предметом исследований явились гидродинамические закономерности, процессы массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания.

Цель работы: разработка научных основ процессов массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания в аппаратах с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, создание научно-

обоснованных методов их расчета и проектирования и апробация полученных результатов в опытно-промышленных условиях с реализацией в промышленности.

Научная новизна исследования:

- принимая, что движение газа в объеме насадки осуществляется по извилистым каналам, получены расчетные зависимости для определения удельной поверхности трубчато - шаровой насадки (трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей), их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;

- исходя из выявленных закономерностей вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости в объеме регулярно-взвешенной насадки, получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя;

- с использованием теории о локальной изотропной турбулентности и применяя диссипативный подход, получено уравнение для определения среднего диаметра капель;

- используя единый механизм вихревого обтекания твердых тел и течения фаз через крупные отверстия тарелок, получена частотная характеристика, связывающая частоту истечения струи жидкости при распаде пленки жидкости стекающей с трубчатого элемента с частотой срыва вихря, возникающего при обтекании труб;

- используя подход, основанный на аналогии между трением и массоотдачей, получено уравнение для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе при малых скоростях газового потока. При повышенных скоростях газа в условиях барботажа уравнение для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе получено на основе модели обновления поверхности;

- исходя из аналогии процессов тепло- и массообмена при малых и больших скоростях газового потока получены уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи;

- на основе модели турбулентно-диффузионного осаждения твердых частиц получена формула для расчета коэффициента турбулентной диффузии, которая используется для определения эффективности пылеулавливания.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований закономерностей вихревого взаимодействия потоков научно обоснована методология расчета аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой для проведения процессов массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания.

Практическая ценность. Разработана конструкция аппарата, защищенная патентом РК на полезную модель №3356.

Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

для проведения процессов массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания.

Публикации по теме исследования. По теме диссертации опубликованы 21 статья, из них 16 статей в материалах международных конференций, 1 статья в издании входящем в международную базу научных журналов SCOPUS, 4 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, получен 1 патент РК на полезную модель. Материалы статей охватывают основное содержание диссертации.

Во введении дана оценка современного состояния решаемой научной проблемы, основание и исходные данные для разработки темы, обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы, сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки и метрологическом обеспечении диссертации, актуальность и новизна темы, связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами, цель, объект и предмет, задачи исследования, методологическая база, положения, выносимые на защиту, практическая ценность и апробация практических результатов.

В первом разделе проведен анализ работы аппаратов со взвешенной и с регулярной подвижной насадкой в процессах массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания, а также методики их расчета. На основании проведенного анализа осуществлена постановка задач исследований.

Во втором разделе дано описание экспериментальных установок для исследования гидродинамических параметров, тепломассообменных характеристик и пылеулавливания, а также методик проведения экспериментов.

Диапазон изменения режимных параметров в проводимых исследованиях: скорость газа w_{Γ} - 1÷5 м/с; плотность орошения L - 10÷75 м³/м²·ч; температура воздуха $t_{\text{возд.}}$ = 20÷100 °С; температура теплоносителя в трубчатом пучке $t_{\text{ж}}$ = 16÷100 °С; конструктивных параметров: шаг между трубами по вертикали $t_{\text{в}}/b$ - 4; по горизонтали $t_{\text{п}}/b$ - 2; размер трубчатых элементов: $d = 0,025$ м; $\ell = 0,34$ м; размер шаров; $d_{\text{ш}} = 0,015$ м; высота статического слоя $H_{\text{ст}} = 0,015 \div 0,03$ м; опорно-распределительная решетка (свободное сечение): плоская $S_0 > 0,95$ м²/м²; пирамидальная $S_{\text{к}}/S_{\text{ап}} = 0,28$ м²/м².

Дано описание аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой двух типов: трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой и получено уравнение для расчета эквивалентного диаметра:

$$d_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot m \cdot [12 \cdot t_{\text{п}} \cdot t_{\text{с}} - \pi \cdot (6 \cdot d_{\text{мп}}^2 + n_1 \cdot n_2 \cdot d_{\text{ш}}^2)]}{3 \cdot \pi (m \cdot d_{\text{мп}} + d_{\text{ш}})} \quad (1)$$

Для изучения закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки проведены

исследования гидродинамических параметров, визуальные наблюдения и фотографирование структуры слоя.

Исследования проведены при неизменных конструктивных параметрах трубчатой насадки ($t_b/b=4$; $t_p/b=2$) для плоских и пирамидальных опорно-распределительных решеток при отсутствии орошения и при подаче орошения: с одним и двумя слоями шаровой насадки; с одной нижней опорно-распределительной решеткой и секционированной несколькими опорно-распределительными решетками. Было установлено, что численные показатели гидравлического сопротивления являются значительными и применение секционированных аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой может быть экономически оправдано в случае их использования для очистки пыли, обладающей повышенными адгезионными свойствами. В связи с этим дальнейшие исследования нами проведены для аппаратов с одной нижней опорно-распределительной решеткой.

При изменении скорости газового потока отмечено наличие четырех гидродинамических режимов: стационарного состояния насадки, переходного, развитой турбулентности и брызгоуноса.

Для расчета гидравлического сопротивления аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой предложено уравнение:

$$\Delta P_L = \Delta P_{тр} + \Delta P_{пн}, \quad (2)$$

в котором $\Delta P_{тр}$ определяется по известному уравнению для аппаратов с регулярной подвижной насадкой. Входящий в нее коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле:

$$\xi_L = 0,53 \cdot \theta_s \cdot \theta_p \cdot Re_{ж}^{0,1} \quad (3)$$

Гидравлическое сопротивление взвешенного слоя орошаемой шаровой насадки:

$$\Delta P_{пн} = (1 - \varepsilon_{ш}) \cdot \rho_n \cdot g \cdot H_{ст} + \kappa_s \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot h_{ж} \quad (4)$$

где κ_s – корректирующий коэффициент. Для аппарата с трубчато-взвешенной насадкой $\kappa_s = 0,558$; для аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой $\kappa_s = 0,65 \cdot S_{ап}/S_{к}$.

В общем случае количество удерживаемой жидкости и газосодержание слоя рассчитывают по формулам:

$$h_0^{общ} = h_0^{ВН(ФН)} + h_0^{тр} \quad (5)$$

$$\varphi_{общ} = \varphi_{тр} \cdot \varphi_{ВН(ФН)} \quad (6)$$

Количество удерживаемой жидкости и газосодержание слоя рассчитывают по известным уравнениям для аппаратов с регулярной трубчатой насадкой.

Количество жидкости удерживаемой взвешенной шаровой насадкой определяют по формуле:

$$h_{ж} = \frac{\rho_{г} \cdot W_{г}^2}{\rho_{ж} g Fr} , \quad (7)$$

в которой критерий Фруда:

$$Fr = A \left(\frac{W_{г}}{W_{ж}} \right)^a \cdot \left(\frac{H_{ст}}{d_{н}} \right)^b \left(\frac{\rho_{н}}{\rho_{ж}} \right)^c \cdot B \quad (8)$$

Для аппарата с трубчато-взвешенной насадкой: $A=0,0084$; $a=0,29$; $b=-0,25$; $c=0,1$; $B=1$; для аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой: $A=0,0033$; $a=0,43$; $b=-0,25$; $c=0,1$; $B=\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{0,15}$.

Газосодержание:

$$\varphi = \frac{W_{г}}{C \cdot \sqrt{\frac{g}{\rho_{г}} [\rho_{ж} h_{ж} + (1 - \varepsilon_{ш}) \rho_{н} H_{ст}] + W_{г}}} \quad (9)$$

Коэффициент C : $\varphi_{вн} \sim 0,043$; $\varphi_{фн} \sim 0,065$.

При малых скоростях газового потока (до 3 м/с) определяющими структурными составляющими являются толщина пленки, скорость и диаметр струй, а также диаметр капель в трубчатой насадке. Эти составляющие рассчитываются по известным зависимостям для регулярной трубчатой насадки. При повышенных скоростях газового потока (более 3 м/с) определяющим является диаметр пузырьков. Для области стохастического изменения формы пузырька $Re_{п} \geq 1530$ диаметр пузырька составит:

$$d_{п} = B_{п} \cdot \frac{\sigma^{3/4}}{g^{1/4} \rho_{ж}^{3/4} W_{п}} , \quad (10)$$

где $B_{п}$ - опытный коэффициент.

Из аналогии взаимодействия параллельных вихревых струй при течении потока газа или жидкости через систему поперек к нему расположенных дискретных источников получена частотная характеристика:

$$\psi_{\varepsilon} = \frac{w_2}{u_{ср} \cdot 2\pi \cdot \varepsilon_{ср}} \quad (11)$$

В третьем разделе приведены результаты исследований тепломассообменных характеристик аппарата с комбинированной регулярно взвешенной насадкой в зависимости от режимных и конструктивных параметров. При этом отмечена аналогия изменения полученных кривых с кривыми гидродинамических параметров.

При капельном течении жидкости для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, исходя из аналогии между трением и массоотдачей получено уравнение:

$$\beta_{zs} = 3,17 \cdot \xi_L \cdot \frac{U_k^{13/10} \cdot \rho_{жк}^{2/5} \cdot \nu_z^{5/6}}{d_k^{1/10} \cdot \sigma^{2/5} \cdot D_z^{1/3}} \quad (12)$$

Уравнение для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе в условиях барботажа получено на основе модели обновления поверхности:

$$\beta_{zS} = 15,6 / (1 - \varphi_{ТФ}^{0,75}) \cdot \frac{h_{жк}^{3/4} \cdot g^{1/4} \cdot \psi_\epsilon^{1/4}}{d_n} \cdot D_z^{1/2} \quad (13)$$

Коэффициенты теплоотдачи рассчитывают из условия сохранения постоянства отношения коэффициентов переноса тепла и массы (аналогия Льюиса).

В четвертом разделе приведены результаты исследований параметров пылеулавливания аппарата с комбинированной регулярно взвешенной насадкой в зависимости от режимных и конструктивных параметров.

Основываясь на математической модели турбулентно-диффузионного осаждения твердых частиц, получено уравнение для расчета коэффициента турбулентной диффузии и эффективности пылеулавливания:

$$D_T = 0,177 \cdot (\xi_L)^{1/3} \cdot (1 - \epsilon_{обц})^{1/3} \cdot \left(\frac{H_{cm}}{d_{uu}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{H}{t_B} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_r}{\rho_{жк}} \right)^{1/3} \cdot (h_0)^{-1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot u_r \cdot Stk \quad (14)$$

$$\eta = 3,0 \cdot \left(\frac{W_r \cdot d_k}{D_T} \right)^{-1/4} \quad (15)$$

В пятом разделе приведены рекомендации по проектированию и внедрению аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.

Рекомендации по проектированию содержат сведения о выборе режимных и конструктивных параметров.

По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленного аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, которая внедрена на АО «Актюбинский завод хромовых соединений» в технологической схеме очистки газовых выбросов в процессе окислительного обжига шихты в производстве монохромата натрия. При этом снижена концентрация выбросов пыли и в 34,6 раз уменьшен экономический ущерб.

В заключении даны краткие выводы по результатам диссертационных исследований, оценка полноты решений поставленных задач, разработаны рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов, дана оценка технико-экономической эффективности внедрения и научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.